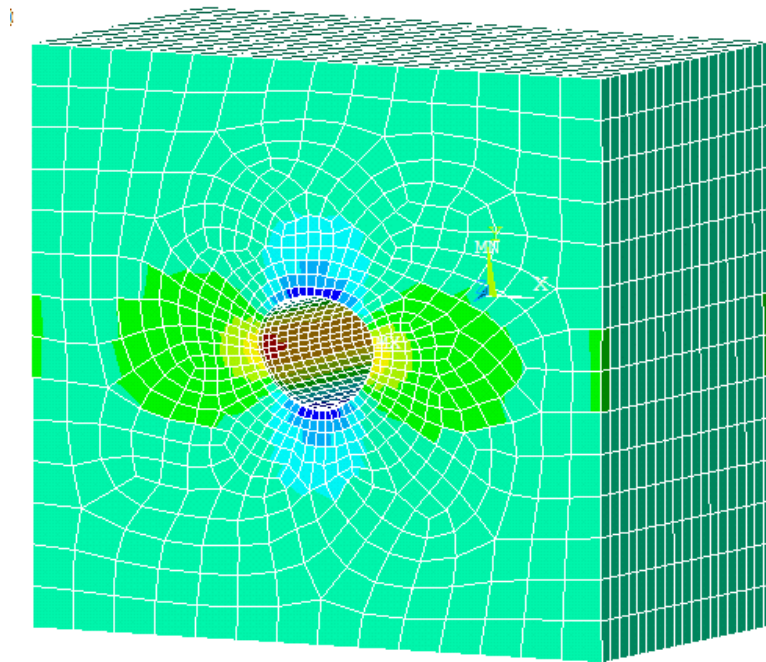


Schuifspanningen loodrecht op een cilindrisch gat



*Colin van Weelden
1379550
Delft, Juni 2010*

*CT3000 Bachelor Eindwerk
TU Delft*

*Begeleiders:
P.C.J. Hoogenboom
C.B.M. Blom*

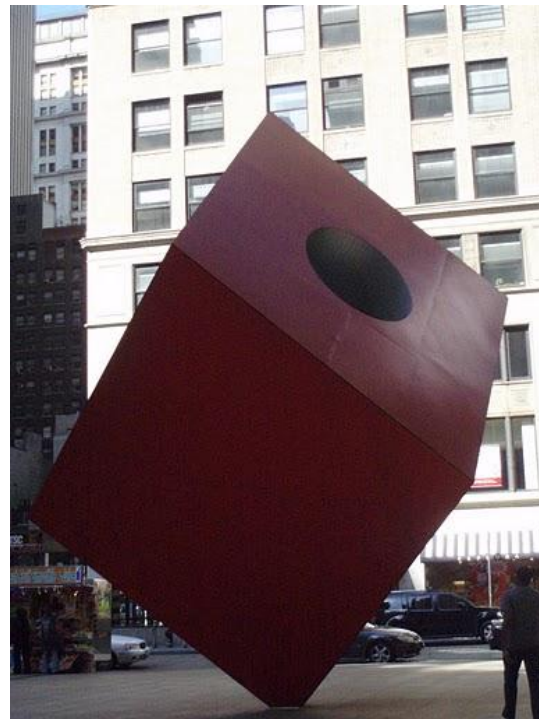
Voorwoord

Dit rapport is het eindresultaat van twee maanden werk in het kader van mijn Bachelor Eindwerk. Het voelt toch als de afsluiting van het eerste deel van mijn studie, en ik hoop me hierna dan ook Bachelor of Science te mogen noemen.

Tijdens een klein uitstapje naar New York, in kader van een studiereis, kwam ik onderstaand kunstwerk tegen. Het is *The Red Cube* van Isamu Noguchi. Omdat dit meteen doet denken aan het model wat voor dit onderzoek is gemaakt, verdiende deze foto een plaats in dit rapport.

Ik ben dank verschuldigd aan Pierre Hoogenboom en Kees Blom, mijn begeleiders.

Colin van Weelden



Inhoudsopgave

Samenvatting.....	4
Inleiding.....	5
Hoofdstuk 1. Probleemstelling.....	7
Hoofdstuk 2. Modellerings.....	9
2.1 Model 1.....	9
2.2 Model 2.....	13
2.3 Model 3.....	17
Hoofdstuk 3. Controle.....	18
3.1 Model 1.....	18
3.2 Model 2.....	18
3.3 Model 3.....	19
Hoofdstuk 4. Resultaten.....	20
4.1 Invloeden.....	20
4.2 Verbanden.....	29
4.3 Controle.....	30
Hoofdstuk 5. Toepassing.....	32
Conclusie.....	33
Bijlage 1. Literatuurlijst.....	34
Bijlage 2. Figurenlijst.....	35
Bijlage 3. ANSYS-scripts.....	36
Bijlage 4. Resultaten.....	41

Samenvatting

De aanwezigheid van een gat in een plaat of een volume veroorzaakt spanningsconcentraties. In veel belastingsgevallen is de verhouding tussen de opgelegde spanning en deze piekspanning bekend. Voor het geval van een schuifspanning loodrecht op een cilindrisch gat is deze nog niet bekend. Een voorbeeld uit de praktijk is het ongelijk zetten van grond om een tunnelbuis, waarbij deze schuifspanningen ontstaan.

Het doel van dit onderzoek is het vinden van de verhouding tussen de piekspanning en de opgelegde spanning, de 'verrevelde spanning', de spanning in een ongestoord gedeelte van het volume. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een eindige-elementenberekening met het programma ANSYS. Op een blokvormig volume, met daarin een cilindrisch gat, wordt op vier zijden een vervorming opgelegd. Deze vervormingen veroorzaken de benodigde schuifspanningen.

De berekeningen leveren waarden op voor de verrevelde spanning en de piekspanning. Deze worden gebruikt om de invloed te vinden van:

- Elasticiteitsmodulus E
- Straal van het gat r
- Dwarscontractiecoëfficiënt ν
- De afmetingen van het volume a
- De grootte van de opgelegde vervorming op één zijde d op de grootte van deze spanningen.

Geen van bovenstaande parameters bleek invloed te hebben op de verhouding tussen de piek- en de verrevelde spanning. De volgende relatie blijkt te gelden:

$$\text{Piekspanning} = 2 \times \text{Verrevelde spanning}$$

Op de grootte van deze twee spanningen is alleen de straal r niet van invloed, de overige parameters wel. De volgende relaties gelden:

$$\text{Verrevelde spanning} = 2 \times \frac{E}{(1 + \nu)} \times \frac{d}{a} \quad \text{en dus} \quad \text{Piekspanning} = 4 \times \frac{E}{(1 + \nu)} \times \frac{d}{a}$$

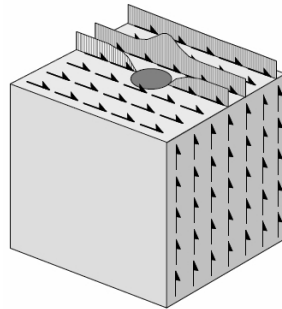
Waarbij duidelijk vermeld moet worden dat de vervorming d op vier zijden is opgelegd. Deze relaties zijn theoretisch verklaarbaar, en gelden ook nog na een numerieke controle.

Nader onderzoek zou de geldigheid kunnen bepalen, door te onderzoeken voor welke waarden van de parameters de formules geldig zijn. Daarnaast is de toepasbaarheid te vergroten door in het cilindrische gat een (tunnel)buis met een bepaalde dikte te modelleren.

Inleiding

Een opening in een plaat of een volume veroorzaakt spanningsconcentraties. Voor veel situaties met een gat in een plaat of volume, bestaan formules voor de verhouding tussen de opgelegde spanning en de optredende piekspanning(en). Echter, voor schuifspanning loodrecht op een cilindrische opening bestaat nog geen formule. Dit is opmerkelijk omdat deze situatie in de werkelijkheid weldegelijk voorkomt, bijvoorbeeld bij een geologische zetting rond een tunnelbuis.

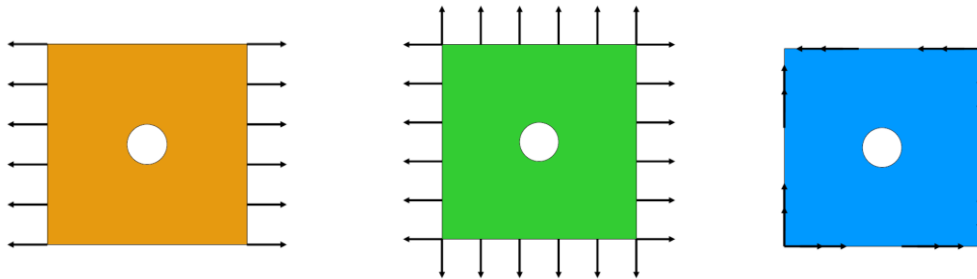
Doel van dit onderzoek is om met behulp van het eindige-elementenprogramma ANSYS de piekspanning te berekenen rond een cilindrisch gat in een oneindig continuüm, ten gevolge van schuifspanning. Vooral de verhouding tussen de opgelegde spanningen en de piekspanning is erg belangrijk. Tijdens het onderzoek is de invloed bepaald van de straal r , de elasticiteitsmodulus E , de dwarscontractiecoëfficiënt ν , de afmetingen a van het representatieve volume en het aantal elementen. Dit alles leidt tot een hanteerbare ingenieursformule die met een aantal meespelende variabelen de eerder genoemde verhouding geeft, en waar mogelijk een formule voor de piekwaarde van de spanning.



In het eerste hoofdstuk wordt zal uiteengezet wat het te behandelen probleem is. Vervolgens worden de gebruikte computermodellen getoond in hoofdstuk twee. Het derde hoofdstuk bevat een controle van de gemaakte modellen op geldigheid en onzuiverheden. Hoofdstuk vier geeft een overzicht van de rekenresultaten en legt verbanden tussen de verschillende parameters. Het hoofdstuk wordt afgesloten met een theoretische en numerieke controle van de gevonden verbanden. Het laatste hoofdstuk wordt gewijd aan mogelijkheden voor verder onderzoek. Tot slot bevat het rapport een conclusie en een aantal bijlagen.

Hoofdstuk 1. Probleemstelling

Een gat in een plaat of een volume heeft grote invloed op de spanningsverdeling. Van groot belang is het dan ook te weten hoe groot de maximaal optredende spanning is, die ontstaat bij het belasten van een plaat of volume met een gat erin. Voor veel situaties zijn de gevolgen al uitgezocht, waarvan een goede beschrijving gemaakt is door Timoshenko en Goodier¹. Enkele voorbeelden worden gegeven in Figuur 1.1. Voor deze situaties zijn formules en vuistregels bekend voor de maximaal optredende spanning.



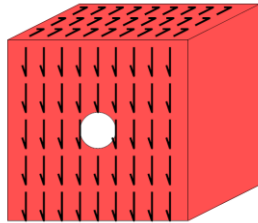
Figuur 1.1 Plaat onder trek; Plaat onder trek en druk; Plaat onder schuifspanning

Dit is echter voor één situatie nog niet gedaan, waarbij een schuifspanning wordt aangebracht op een blokvormig volume zoals in Figuur 1.2. Het is voor te stellen als een blok, met daarin een cilindervormig gat, waarbij de schuifspanning dus loodrecht op de opening optreedt. Een voorbeeld uit de praktijk waarop dit betrekking zou kunnen hebben, is het optreden van geologische zettingen rond een tunnelbuis.

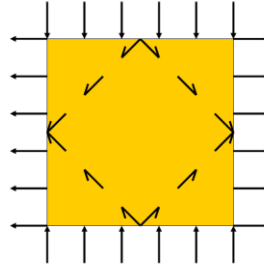
¹ S.P. Timoshenko en J.N. Goodier (1934). *Theory of Elasticity* 3e dr. Singapore: McGraw-Hill, Inc.

Een spanningsverdeling zoals hierboven beschreven is op drie manieren te realiseren:

- Men brengt direct een schuifspanning aan op de vlakken, zoals in Figuur 1.2.
- Men brengt op twee vlakken een drukspanning aan, en op twee vlakken een trekspanning. Op interne vlakken die hier onder een hoek van 45° op staan, ontstaat een schuifspanning. Dit principe is geïllustreerd in Figuur 1.3.

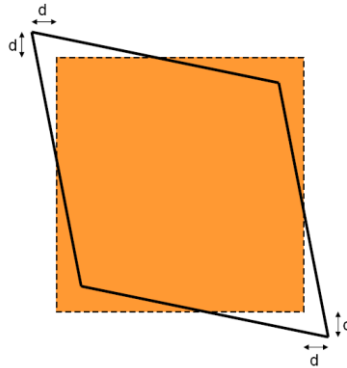


Figuur 1.2 Schuifspanning op volume



Figuur 1.3 Schuifspanning door normaalspanningen

- Een schuifspanning is ook te realiseren door, in plaats van een belasting, juist een vervorming op te leggen. Door het volume te laten vervormen zoals in Figuur 1.4, ontstaan ook de benodigde schuifspanningen.



Figuur 1.4 Opgelegde vervorming – zij aanzicht

Aanpak

Een goede manier om deze situaties te onderzoeken is door gebruik te maken van een eindig-elementenprogramma. Voor dit onderzoek wordt ANSYS gebruikt. Met dit programma wordt het volume opgedeeld in een (groot) aantal kleinere volume-elementen. Vervolgens worden materiaaleigenschappen, belastingen en oplettingen toegevoegd.

In ANSYS zijn de drie bovenstaande situaties gemodelleerd, waarna de invloed van verschillende parameters is onderzocht:

- Elasticiteitsmodulus E
 - Straal van het gat r
 - Dwarscontractiecoëfficiënt ν
 - De afmetingen van het volume
 - De grootte van de opgelegde belastingen/vervormingen
- Daarnaast is gekeken of het aantal elementen wat gebruikt wordt voor de berekening van invloed is.

Het is de piekspanning die - in theorie - rond het gat optreedt, waar het uiteindelijk om draait. Er is getracht een verband tussen deze piekspanning en bovengenoemde parameters te vinden. Daarnaast is vooral de verhouding tussen de spanning in het gebied waar het gat geen invloed heeft en de piekspanning een interessant onderwerp. Voor de situaties uit Figuur 1.1 is deze al bekend, daar is de piekspanning respectievelijk 3, 2 en 4 maal zo groot als de opgelegde spanning. Voor de situatie in dit onderzoek is deze verhouding nog onbekend.

Hoofdstuk 2. Modelleren

In dit hoofdstuk worden zullen de gebruikte modellen omschreven en worden toegelicht aan de hand van afbeeldingen. Het betreft drie modellen die gemaakt zijn met behulp van het eindig-elementenprogramma ANSYS. Elk model maakt gebruik van een ander principe, zoals omschreven in Hoofdstuk 1. In een later hoofdstuk zal worden onderzocht welke van de modellen de gewenste betere resultaten oplevert.

De parameters zijn zo ingevoerd dat deze gemakkelijk gewijzigd kunnen worden. Waarden die worden gebruikt in de scripts zijn slechts bedoeld om de lezer een indruk te geven van de werking. In dit stadium zijn de waarden dan ook nog niet onderzocht of onderbouwd. De scripts, zonder toelichting, zijn ook te vinden in Bijlage 3.

2.1 Model 1

Dit model bevat een blokvormig volume, met een lengte l , een breedte b , en een hoogte h . Hier doorheen loopt een cilindrische buis met een straal r . Door schuifkrachten op vier van de vlakken aan te brengen, ontstaan er ook schuifspanningen in het blok.

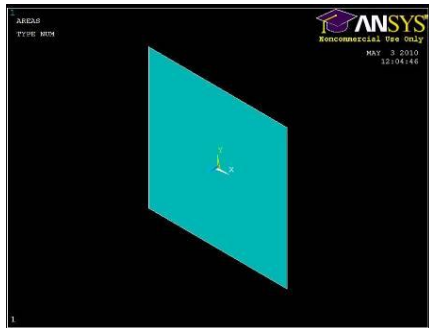
Geometrie

Als eerste is het zaak de geometrie vast te leggen van het object. Aan een aantal parameters wordt daarom een waarde toegekend.

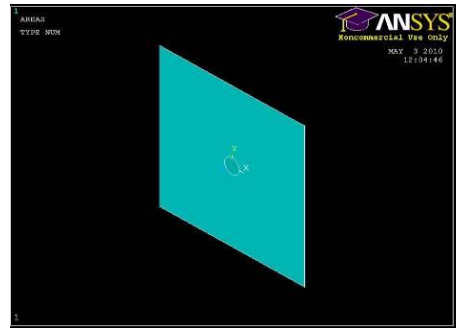
LENGTH=50000	!LENGTE L VAN HET VOLUME
WIDTH=50000	!BREEDTE B VAN HET VOLUME
HEIGHT=50000	!HOOGTE H VAN HET VOLUME
RADIUS=2500	!STRAAL R VAN DE BUIS

Vervolgens is het zaak om met deze waarden een volume te maken, met in het midden een cilindrisch gat.

BLC4,-WIDTH/2,-HEIGHT/2,WIDTH,HEIGHT	!RECHTHOEK, GROOTTE B*H
CYL4,0,0,RADIUS	!CIRKEL MET STRAAL R



Figuur 2.1 Creëren rechthoek



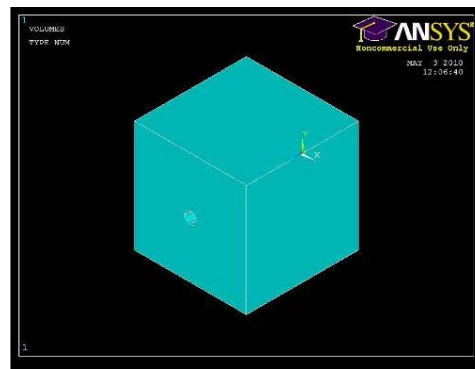
Figuur 2.2 Creëren cirkel

```
ASBA,1,2
VEXT,3,,,,,LENGTH
```

```
!OPPERVLAKTE CIRKEL UIT RECHTHOEK HALEN
!ONTSTANE OPPERVLAK UITREKKEN TOT LENGTE L
```



Figuur 2.3 Cirkel van rechthoek aftrekken



Figuur 2.4 Uitrekken tot lengte l

Materiaaleigenschappen

Vervolgens is het noodzakelijk dat er aan dit volume bepaalde eigenschappen worden toegekend, in overeenstemming met het gemodelleerde materiaal. Als men het volume van staal zou laten zijn, zouden onderstaande waarden gebruikt kunnen worden voor de elasticiteitsmodulus en de dwarscontractiecoëfficiënt.

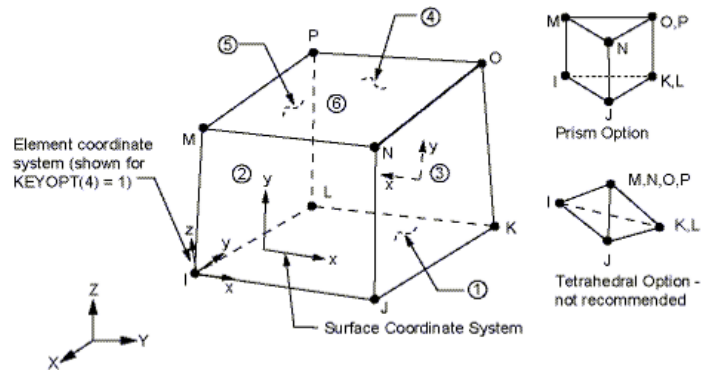
```
YOUNG=200000
DWARSC=0.3
```

```
!E-MODULUS
!DWARSCONTRACTIECOEFFICIENT
```

```
MP,EX,I,YOUNG
MP,PRXY,I,DWARSC
```

Elementen

Nu is het tijd om het volume op te delen in een eindig aantal elementen. Hiervoor is het nodig dat de ontstane volume-elementen een bepaald elementtype toegewezen krijgen. Hier is gekozen voor het type *Solid45*. Elementen van dit type zijn bij voorkeur blokvorming en hebben acht knopen, met elk drie vrijheidsgraden: translatie in x,y, en z-richting. Zie ook Figuur 2.5.



Figuur 2.5 Geometrie van SOLID45

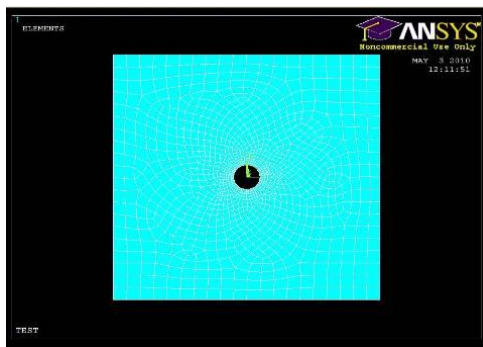
```
ET,VI,SOLID45
TYPE, I
MAT,
REAL,
ESYS, 0
SECNUM,
```

!ELEMENTTYPE SOLID45

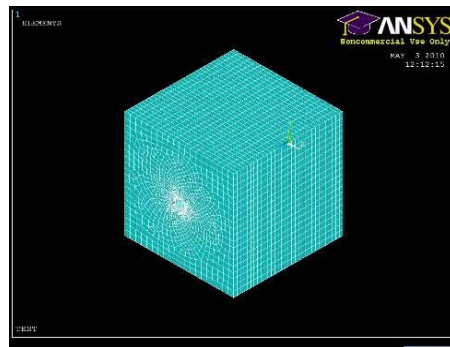
```
SMRT,6
SMRT,I
ESIZE,2500,0,
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , I
CM,_YI,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
```

```
VSWEEP,_YI
```

```
CMDELE,_Y
CMDELE,_YI
CMDELE,_Y2
```



Figuur 2.6 Vooraanzicht het opgedeelde volume



Figuur 2.7 Het opgedeelde volume

Belastingen en opleggingen

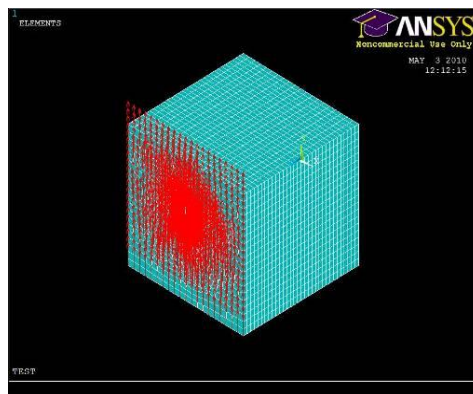
Het aanbrengen van een directe schuifspanning in ANSYS bleek niet mogelijk, vandaar dat op elke knoop apart een kracht is aangebracht. De grootte van deze krachten verschilt per vlak,

omdat het aantal knopen niet gelijk is in elk vlak. Zo is de som van alle krachten op een vlak voor elk vlak wel gelijk.

SPANNING = 10

```
NSEL,S,LOC,Z,LENGTH
*GET, AANTAL1,NODE, 0,COUNT
*GET,OPPERVLAK1,AREA,1,AREA
KRACHT=SPANNING*OPPERVLAK1/AANTAL1
F,ALL,FY,KRACHT
NSEL,ALL
```

```
!SELECTEER ALLE KNOPEN OP HET VLAK
!TEL DE KNOPEN
!GROOTTE VAN HET OPPEVLAK
!BENODIGDE KRACHT PER KNOOP
!BRENG DE KRACHT AAN
!RESET DE SELECTIE
```



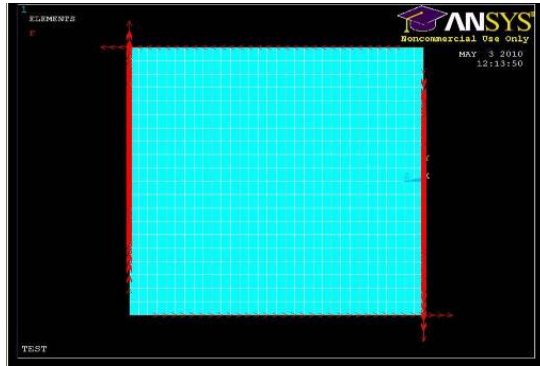
Figuur 2.8 Belasting op één van de vlakken

Er is nu op één van de vier vlakken een belasting aangebracht. Dit dient ook nog op drie andere vlakken te gebeuren.

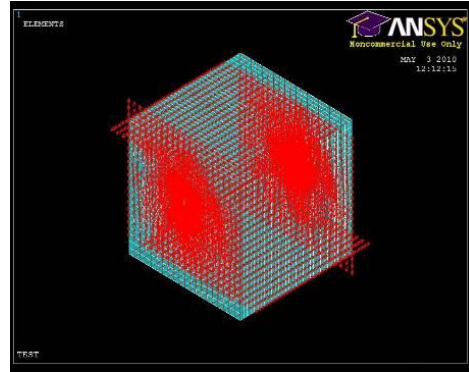
```
NSEL,S,LOC,Z,0
*GET, AANTAL2,NODE, 0,COUNT
*GET,OPPERVLAK2,AREA,3,AREA
KRACHT=SPANNING*OPPERVLAK2/AANTAL2
F,ALL,FY,-10000
NSEL,ALL
```

```
NSEL,S,LOC,Y,HEIGHT/2
*GET, AANTAL,NODE, 0,COUNT
*GET,OPPERVLAK,AREA,5,AREA
KRACHT=SPANNING*OPPERVLAK/AANTAL
F,ALL,FZ,10000
NSEL,ALL
```

```
NSEL,S,LOC,Y,-HEIGHT/2
*GET, AANTAL,NODE, 0,COUNT
*GET,OPPERVLAK,AREA,2,AREA
KRACHT=SPANNING*OPPERVLAK/AANTAL
F,ALL,FZ,-10000
NSEL,ALL
```



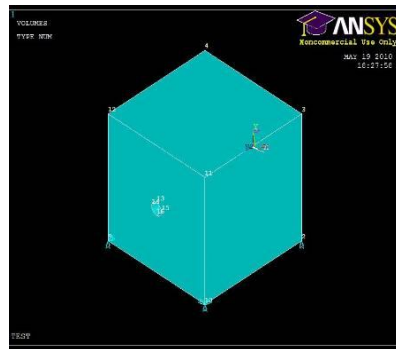
Figuur 2.9 Belasting op vier zijden - zij aanzicht



Figuur 2.10 Belasting op vier zijden - 3D

Om een statisch bepaalde “constructie” te krijgen, dient op zes plaatsen een vrijheidsgraad te worden beperkt.

```
DK,10,UY,0,,,UX,UZ
DK,9,UY,0,,,UZ
DK,2,UY,0
```



Figuur 2.11 Opleggingen

Het model is nu klaar om gebruikt te worden voor berekeningen.

2.2 Model 2

Dit model creëert een ander volume dan het eerste model. Het blokvormige volume wordt nu 45° gedraaid, waardoor de buis niet meer loodrecht op de oppervlakken staat, maar nu als het ware schuin door het blok snijdt.

Geometrie

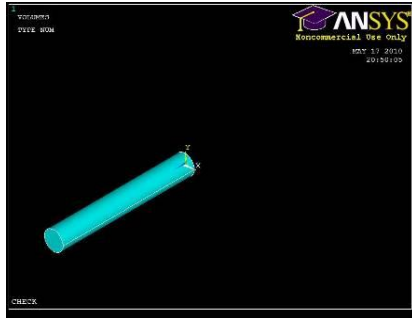
Ook hier is het nodig enkele parameters te definiëren. Vanwege de aard van het volume is alleen een breedte en een hoogte nodig.

```
WIDTH=50000
HEIGHT=50000
RADIUS=2500
```

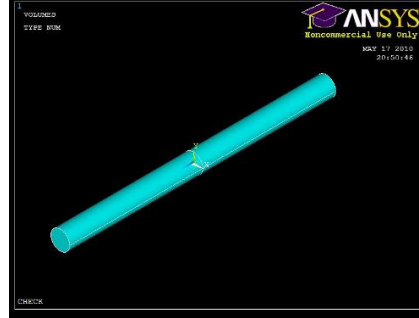
```
!BREEDTE B VAN HET VOLUME
!HOOGTE H VAN HET VOLUME
!STRAAL R VAN DE BUIS
```

Met behulp van deze waarden zal een volume worden gemaakt. Eerst worden twee cilinders gevormd, waardoor er een buis ontstaat met de oorsprong als middelpunt.

```
CYL4,0,0,RADIUS,,,,HEIGHT/SQRT(2)
CYL4,0,0,RADIUS,,,,-HEIGHT/SQRT(2)
```



Figuur 2.12 Eerste helft cilinder



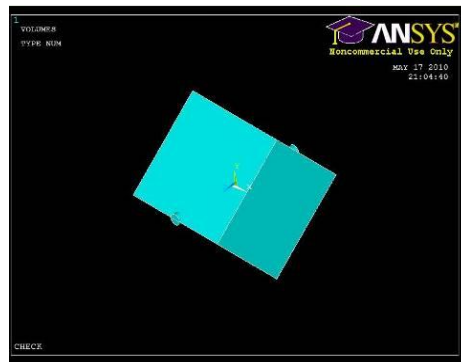
Figuur 2.13 Tweede helft cilinder

Vervolgens wordt hieromheen een blokvormig volume gemaakt, dat 45 graden gedraaid is ten opzichte van model 1.

```
K,101,WIDTH/2,0,HEIGHT/SQRT(2)
K,102,WIDTH/2,HEIGHT/SQRT(2),0
K,103,WIDTH/2,0,-HEIGHT/SQRT(2)
K,104,WIDTH/2,-HEIGHT/SQRT(2),0
K,105,-WIDTH/2,0,HEIGHT/SQRT(2)
K,106,-WIDTH/2,HEIGHT/SQRT(2),0
K,107,-WIDTH/2,0,-HEIGHT/SQRT(2)
K,108,-WIDTH/2,-HEIGHT/SQRT(2),0
```

```
A,101,102,103,104
A,105,106,107,108
A,101,105,108,104
A,102,106,107,103
A,101,102,106,105
A,103,104,108,107
```

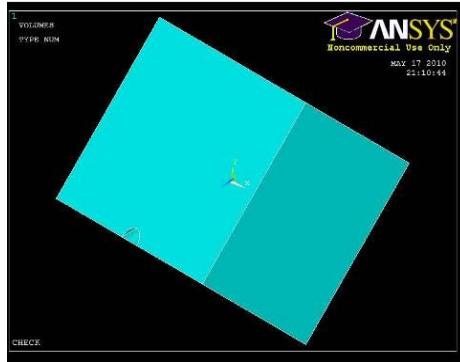
```
VA,9,10,11,12,13,14
```



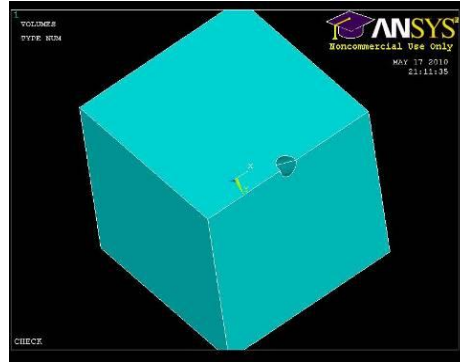
Figuur 2.14 Blok om cilinder

Als nu vervolgens de cilinder uit het blok wordt gehaald, ontstaat het volgende volume.

VSBV,3,1
VSBV,4,2



Figuur 2.15 Uiteindelijke volume



Figuur 2.16 Uiteindelijke volume

Materiaaleigenschappen

Ook bij dit model worden materiaaleigenschappen aan het volume toegekend. De waarden zijn wederom indicatief.

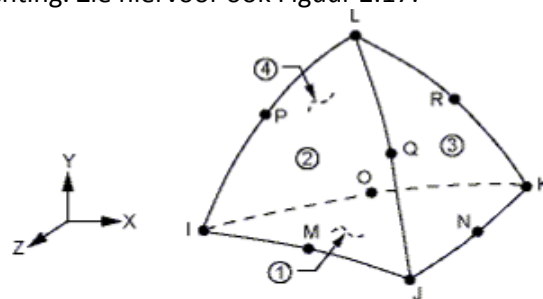
YOUNG=200000
DWARSC=0.3

!E-MODULUS
!DWARSCONTRACTIECOEFFICIENT

MP,EX,I,YOUNG
MP,PRXY,I,DWARSC

Elementen

Vanwege de vorm van dit model – het gat dat niet alle oppervlakken op dezelfde plek snijdt en de scheefstand van het blok - levert het voor ANSYS problemen op om het in zes- of achthoekige elementen op te delen. Het elementtype *SOLID45* is hierdoor ook minder geschikt. Vandaar dat wordt gekozen voor het type *SOLID92*, waarmee het volume wordt opgedeeld in viervlakken. Een element van het type *SOLID92* heeft tien knooppunten, met elk drie vrijheidsgraden: translatie in x,y, en z-richting. Zie hiervoor ook Figuur 2.17.



Figuur 2.17 Geometrie van *SOLID92*

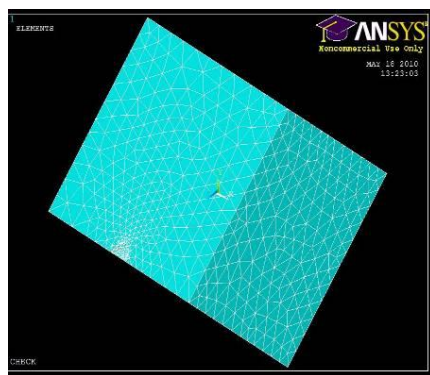
```

ET,VI,SOLID92

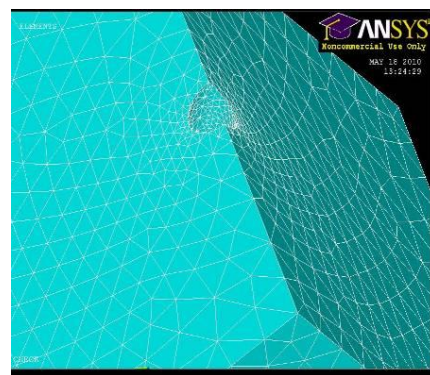
SMRT,I
CM,_Y,VOLU
VSEL,,,I
CM,_YI,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
VCLEAR,_YI
VMESH,_YI
CMDELE,_Y
CMDELE,_YI
CMDELE,_Y2

```

Het opgedeelde volume ziet er als volgt uit:



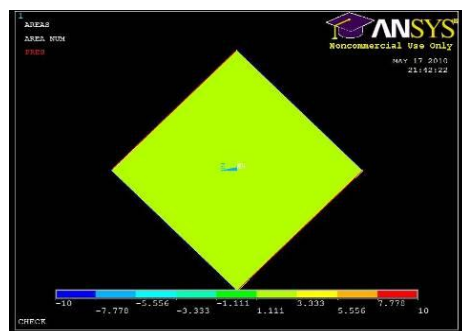
Figuur 2.18 Opgedeeld volume



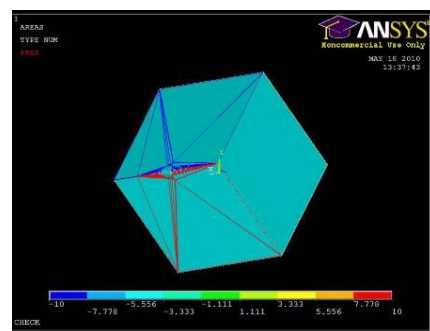
Figuur 2.19 Opgedeeld volume: detail

Belastingen en opleggingen

In tegenstelling tot de schuifkrachten die zijn aangebracht in Model 1, wordt nu gebruik gemaakt van normaalspanningen. Door deze op de juiste plaats aan te brengen, ontstaan ook schuifspanningen in het materiaal, zoals in Figuur 1.3. Op twee vlakken wordt een negatieve normaalspanning aangebracht, en op twee andere vlakken een positieve normaalspanning, zoals te zien is in Figuur 2.20 en Figuur 2.21.



Figuur 2.20 Normaalspanningen – zij aanzicht



Figuur 2.21 Normaalspanningen - 3D

Nu kan met het model de spanningsverdeling worden berekend.

2.3 Model 3

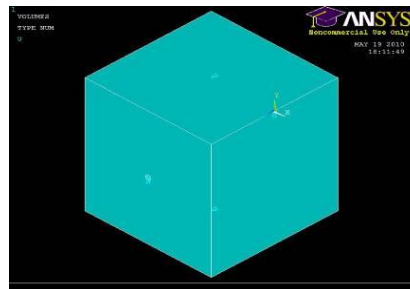
Dit model zal gebruik maken van een direct opgelegde vervorming op het volume, waardoor ook schuifspanningen zullen ontstaan. Geometrie, materiaaleigenschappen en elementen zijn gelijk aan die van Model 1, slechts de belastingen verschillen.

Belastingen en oplettingen

In plaats van het volume op te leggen op een aantal punten, worden op vier vlakken nu een vervorming opgelegd. Deze veroorzaakt schuifspanningen in het volume, en dient tegelijkertijd als belasting en als opletting.

```
VERV=250
DA,1,UY,VERV
DA,3,UY,-VERV
DA,5,UZ,VERV
DA,2,UZ,-VERV
```

!GROOTTE VAN DE VERVORMING



Figuur 2.22 De plaatsen van de opgelegde vervormingen

Om er voor te zorgen dat het volume niet in andere richtingen grote verplaatsingen zal ondergaan, wordt het in x-richting opgelegd.

```
DL,18,,UX,0
DL,17,,UX,0
```

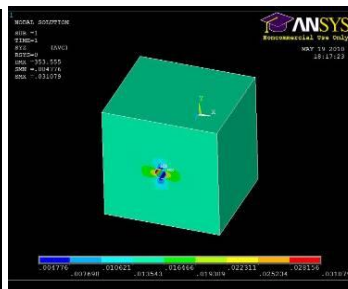
Analyse en resultaten

Na een statische berekening worden de schuifspanningen in het midden van het volume getoond. Spanningen in het midden van het volume kunnen als volgt worden bekeken:

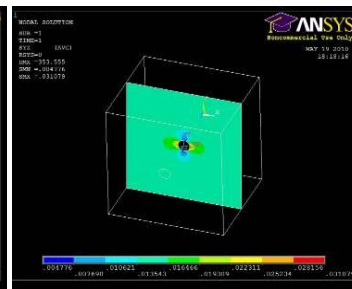
```
WPOFFS,0,0,1/2*LENGTH !OFFSET WORKING PLANE NAAR MIDDEN VAN MOOT
/CPLANE,1
/TYPE,1,8
PLNSOL, S,YZ, 0,1,0 !SELECTEER VLAK TPV HET MIDDEN
!PLOT YZ-SCHUIFSPANNINGEN
```



Figuur 2.23 Vervormd volume



Figuur 2.24 Schuifspanningen



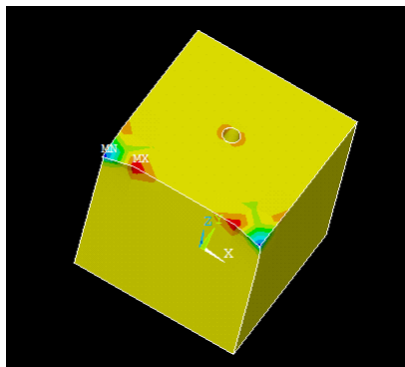
Figuur 2.25 Doorsnede in het midden

Hoofdstuk 3. Controle

De bruikbaarheid van de modellen is van groot belang. Een model dat geen goede resultaten geeft, kan niet worden gebruikt voor het onderzoek. In dit hoofdstuk worden de modellen gecontroleerd op fouten, en gekeken of de modellen geschikt zijn om te gebruiken.

3.1 Model 1

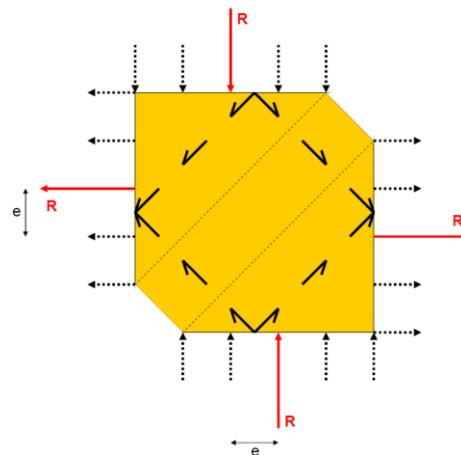
Het grootste probleem bij dit model ontstaat bij de opleggingen. Vanwege het niet in (uitwendig) evenwicht zijn van de constructie, ontstaan er oplegreacties. Deze gaan gepaard met spanningen, die van invloed zijn op de spanningen rond het gat. De waarden die met dit model gevonden worden zijn dan ook niet correct.



Figuur 3.1 Spanningsconcentraties door oplegreacties

3.2 Model 2

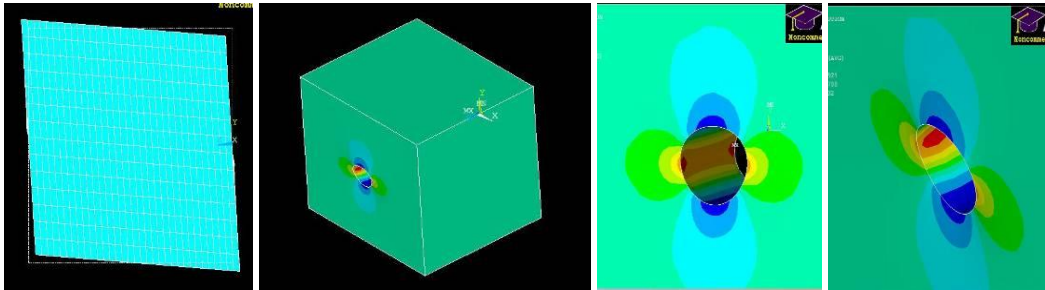
Ook bij dit model is er geen uitwendig evenwicht. Op het eerste gezicht lijkt dit wel zo te zijn, maar de oorzaak hier ligt in de excentriciteit van de belastingen. Door het ontbreken van een stuk oppervlak - vanwege het gat - staan de resulterende krachten niet recht tegenover elkaar. De kleine excentriciteit die zo in beide richtingen ontstaat, veroorzaakt twee momenten met een gelijke richting en grootte $R \times e$. Zie hiervoor ook Figuur 3.2. De totale som van de momenten is dus ongelijk aan nul, met als gevolg dat de constructie niet in evenwicht is en er dus oplegreacties ontstaan. Deze leveren dezelfde problemen als bij Model 1.



Figuur 3.2 Excentrische krachten

3.3 Model 3

Model 3 heeft geen last van bovenstaande problemen, omdat er geen belastingen worden opgelegd. De opgelegde vervormingen zijn in evenwicht met zichzelf en veroorzaken spanningen die ook automatisch in evenwicht zijn. Nu hoeft slechts de invloed van de parameters te worden onderzocht op de schuifspanning rond het gat, en de spanning in de rest van het volume. Dit zal gebeuren in het volgende hoofdstuk.



Figuur 3.3 Vervormd volume; Overzicht van de spanningen; Piekspanningen rond het gat

Hoofdstuk 4. Resultaten

Dit hoofdstuk bevat de resultaten van het onderzoek. In de eerste paragraaf worden de resultaten getoond en wordt er gekeken welke parameters van invloed zijn. Deze invloeden worden in de tweede paragraaf gebruikt om verbanden tussen de spanningen en de parameters te leggen. Tot slot worden deze verbanden gecontroleerd via een theoretische weg en met extra resultaten.

4.1 Invloeden

In deze paragraaf zullen de invloeden van de verschillende parameters onderzocht worden. Er zal worden gekeken naar de spanning in een ongestoord gedeelte – de ‘verrevelspanning’ – en de piekspanning die optreedt rond het gat. Onderzocht wordt de invloed van:

- Elementgrootte
- Volumegrootte a
- Straalgrootte r
- Elasticiteitsmodulus E
- Dwarscontractiecoëfficiënt ν
- Opgelegde verplaatsing d

Het is de verhouding tussen piekspanning en de verrevelspanning waar het vooral om draait.

Elementgrootte

ANSYS kent de functie ‘*SmartSize*’, een handig hulpmiddel bij het opdelen van een object in kleinere elementen. Het heeft een schaal van 1 tot en met 10, waarbij 10 de grofste opdeling is, en 1 de fijnste. Hoe fijner de verdeling, hoe langer ANSYS nodig heeft voor de berekening. Dit loopt van een ordegrrootte van één seconde tot een uur. Natuurlijk worden de resultaten met een fijnere verdeling nauwkeuriger. Ook voorkomt men met een fijnere verdeling (*mesh*) eerder dat er elementen tussen zullen zitten die een vorm krijgen die niet geschikt is voor het huidige elementtype. Deze hebben een negatief effect op de resultaten.

De afweging die gemaakt moest worden is tussen nauwkeurigheid en rekentijd. Zoals eerder gezegd, levert een fijnere *mesh* nauwkeurigere resultaten op, maar dit zal op een gegeven moment convergeren. De rekentijd neemt dan alleen maar toe, terwijl de nauwkeurigheid niet significant groter wordt.

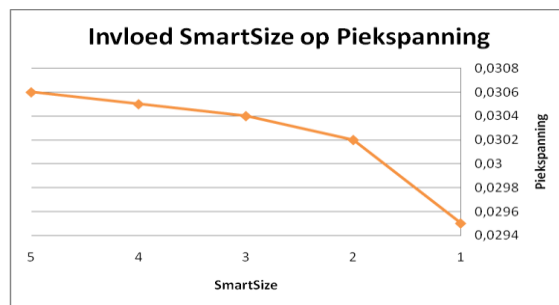
Na voor een SmartSize-waarde van 5 tot en met 1 de resultaten bekeken te hebben, is het volgende geconcludeerd:

- De waarde is niet van invloed op de schuifspanning in het verre veld – het gedeelte ver van het gat vandaan.
- De piekspanning wordt nauwkeuriger naarmate de *mesh* fijner wordt. Vooral tussen SmartSize-waardes van 5,4 en 3 zit verschillen, maar tussen waardes 3,2 en 1 zit weinig verschil meer.
- De verhouding tussen de piekspanning en de verreveldspanning convergeert naar 2.

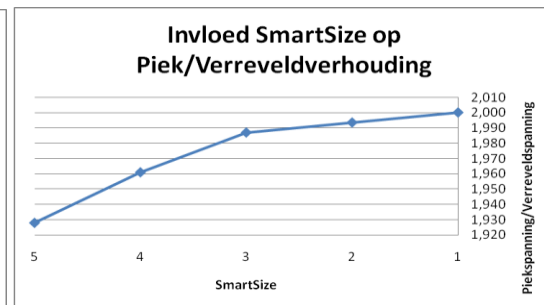
Test	SmartSize	Spanningen		Verhouding Piek/Verreveld
		Verreveld	Piek	
1	5	0,0153	0,0295	1,928
2	4	0,0154	0,0302	1,961
3	3	0,0153	0,0304	1,987
4	2	0,0153	0,0305	1,993
5	1	0,0153	0,0306	2,000

E	2
r	2500
a	50000
v	0,3
d	250

Tabel 4.1 Invloed van de elementgrootte



Grafiek 4.1 Invloed SmartSize op Piekspanning



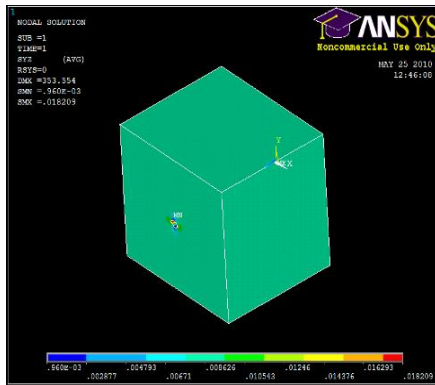
Grafiek 4.2 Invloed SmartSize op de verhouding

Gekozen is om een SmartSize-waarde van 2 of 3 te gebruiken, afhankelijk van de grootte van het volume. Bij kleinere volumes is een fijnere *mesh* mogelijk, omdat er dan minder elementen ontstaan. In uitzonderlijke gevallen wordt daarom een waarde van 1 gebruikt. Grotere volumes werden met een grovere *mesh* opgedeeld. Wat rekentijd betreft, gaat het om een verschil tussen 30 seconden tot 2 minuten (waarde 2) of 10 tot 60 minuten (waarde 1). Een grotere nauwkeurigheid kost veel extra tijd, maar levert weinig extra nauwkeurigheid op.

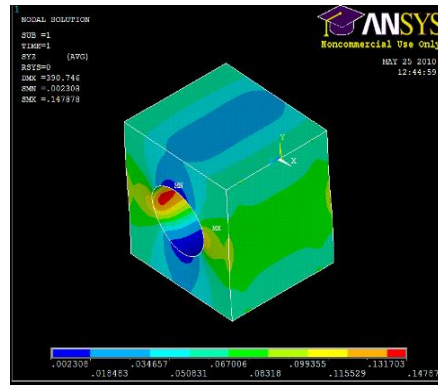
Volumegrootte

Vervolgens wordt bepaald in hoeverre de afmetingen van het volume van invloed zijn op de spanningen. De straal van het gat wordt gelijk gehouden, dus wordt tegelijkertijd ook de invloed van de verhouding straal/volumegrootte bekeken. De waarden van de overige parameters veranderen niet.

Geconcludeerd kan worden dat voor een grote afmeting/straal-verhouding, de invloed van het gat beperkt blijft tot de directe omgeving daarvan. Voor kleinere waarden is deze invloed echter aanzienlijk, zoals te zien is in Figuur 4.2. Ook is voor een kleine verhouding de verreveldspanning niet meer eenduidig af te lezen.



Figuur 4.1 Resultaten van test 7

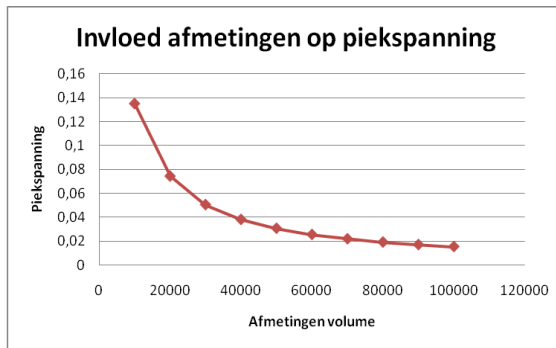


Figuur 4.2 Resultaten van test 14

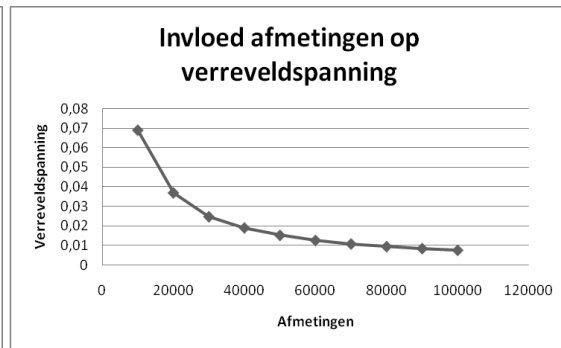
Test	Afmeting	Verhouding Afmeting/straal	Spanningen Verreeld	Piek	Verhouding Piek/Verreeld
6	100000	40	0,0077	0,0153	1,991
7	90000	36	0,0086	0,0170	1,982
8	80000	32	0,0096	0,0191	1,995
9	70000	28	0,0109	0,0218	2,000
10	60000	24	0,0127	0,0254	2,000
5	50000	20	0,0153	0,0306	2,000
11	40000	16	0,0191	0,0380	1,990
12	30000	12	0,0248	0,0504	2,032
13	20000	8	0,0370	0,0743	2,008
14	10000	4	0,0690	0,1350	1,957

Tabel 4.2 Invloed van de volumegrootte

E	2
r	2500
v	0,3
d	250

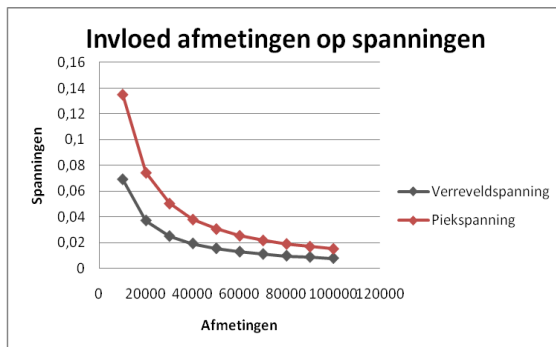


Grafiek 4.3 Invloed afmetingen op piekspanningen

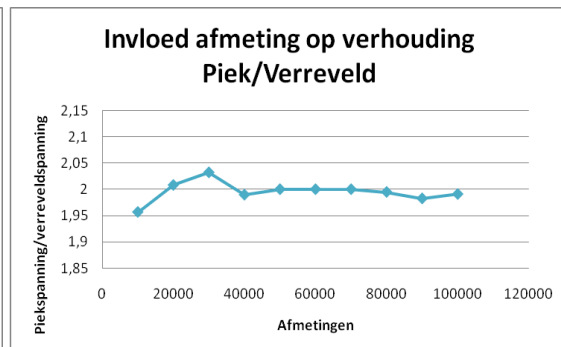


Grafiek 4.4 Invloed afmetingen op verreveldspanning

De resultaten uit Tabel 4.2 en Grafiek 4.6 laten zien dat de afmetingen van het totale volume en de verhouding tussen straal en deze afmetingen geen invloed hebben op de verhouding tussen piekspanning en verreveldspanning. Deze verhouding ligt (ongeveer) op 2. Wel is te zien dat een verhouding afmeting/straal van 20 á 28 een nauwkeurig resultaat geeft. Een te kleine verhouding, en het gat is van invloed op de verreveldspanning, zoals te zien is in Figuur 4.2.



Grafiek 4.5 Invloed afmetingen op spanningen



Grafiek 4.6 Invloed afmetingen op verhouding

Straalgrootte

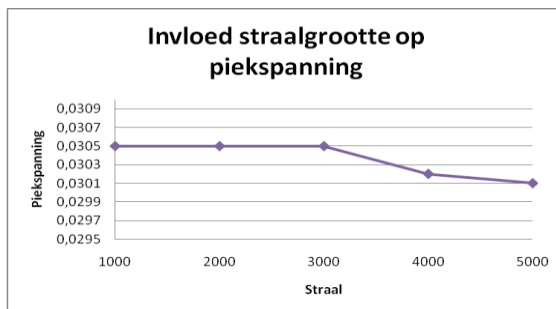
In het voorgaande werd al aangetoond dat de verhouding tussen de straal en de totale afmetingen niet van invloed was op de verhouding tussen piek- en verreveldspanning. Om dit nogmaals te verifiëren, zijn ook verschillende waarden voor de straal getest, waarbij de andere afmetingen gelijk zijn gehouden. De resultaten zijn te vinden in Tabel 4.3.

Test	Straalgrootte	Spanningen		Verhouding Piek/Verrevelde
		Verrevelde	Piek	
17	1000	0,0153	0,0305	1,980
18	2000	0,0154	0,0305	2,013
19	3000	0,0154	0,0305	1,993
15	4000	0,0152	0,0302	1,981
16	5000	0,0150	0,0301	1,981

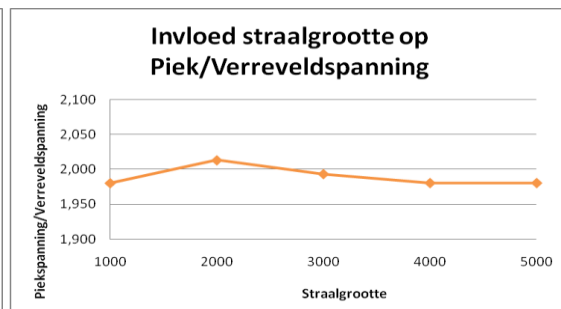
E	2
a	50000
v	0,3
d	250

Tabel 4.3 Invloed van de straalgrootte

Wat wederom uit deze resultaten blijkt, is dat de grootte van de straal geen invloed heeft op de verhouding tussen de twee spanningen, en dat deze ook hier weer 2 bedraagt.



Grafiek 4.7 Invloed straalgrootte op piekspanning



Grafiek 4.8 Invloed straalgrootte op verhouding

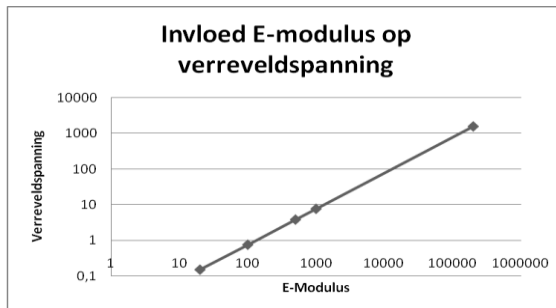
Elasticiteitsmodulus

Het volgende kenmerk wat eventueel een rol zou kunnen spelen is de elasticiteitsmodulus E van de grond. Eenzelfde aanpak als eerder is toegepast, waarbij meerdere waarden van de E -modulus zijn gebruikt, en de overige parameters gelijk zijn gehouden. Een overzicht is te vinden in Tabel 4.4 en de grafieken.

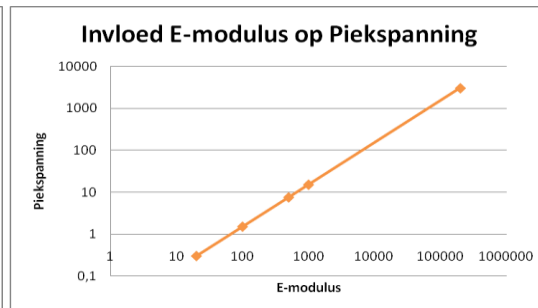
Test	E-modulus	Spanningen		Verhouding Piek/Verrevelde
		Verrevelde	Piek	
20	20	0,153	0,305	1,993
21	100	0,76	1,53	2,013
22	500	3,83	7,63	1,992
23	1000	7,65	15,3	2,000
24	200000	1530	3050	1,993

r	2500
a	50000
v	0,3
d	250

Tabel 4.4 Invloed van de elasticiteitsmodulus

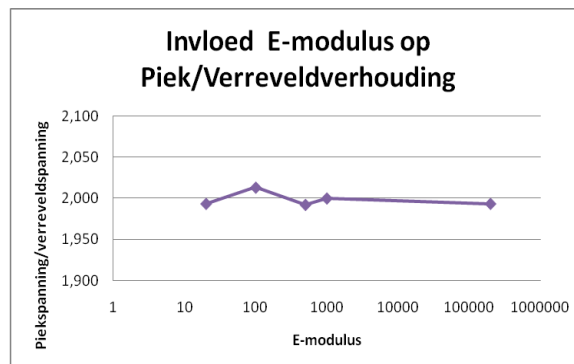


Grafiek 4.9 Invloed E-modulus op verrevelde spanning



Grafiek 4.10 Invloed E-modulus op piekspanning

Als Grafiek 4.9 en Grafiek 4.10 worden vergeleken, is door de logaritmische schaal lastig te zien dat – wederom – de verhouding tussen de twee spanningen een factor 2 bedraagt. Grafiek 4.11 is wat dat betreft een betere visualisatie.



Grafiek 4.11 Invloed E-modulus op verhouding

Dwarscontractiecoëfficiënt

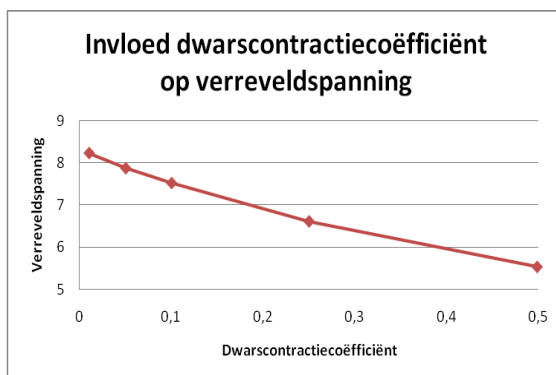
De dwarscontractiecoëfficiënt ν zou mogelijk ook een rol kunnen spelen bij het spanningsverloop. Vandaar dat er ook een serie tests is uitgevoerd waarbij alleen de dwarscontractiecoëfficiënt variabel is genomen, de overige parameters kregen een vaste waarde. De resultaten zijn te vinden in Tabel 4.5.

Test	Dwarscontractie-coëfficiënt	Spanningen Verreveld	Piek	Verhouding Piek/Verreveld
25	0,01	8,23	16,4	1,993
26	0,05	7,87	15,7	1,995
27	0,1	7,52	15,02	1,997
28	0,25	6,61	13,2	1,997
29	0,499	5,53	11,02	1,993

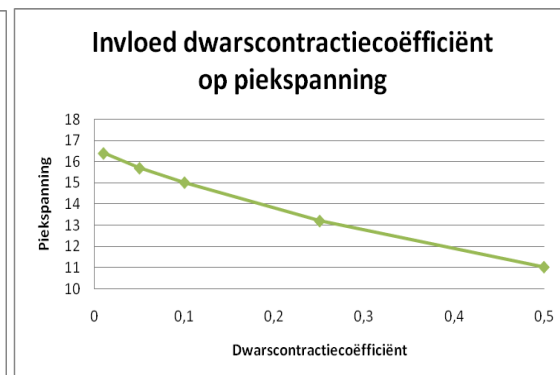
E	2
r	2500
a	50000
d	250

Tabel 4.5 Invloed van de dwarscontractiecoëfficiënt

Wat ook hier weer te zien is, is een verhouding van ongeveer 2 tussen de piekspanning en de verrevelspanning. Een coëfficiënt groter dan 0,5 is geen realistische waarde, het materiaal zou dan naar alle kanten uitzetten als er druk op zou worden uitgeoefend. Vandaar dat slechts waarden tussen 0 en 0,5 zijn gebruikt.

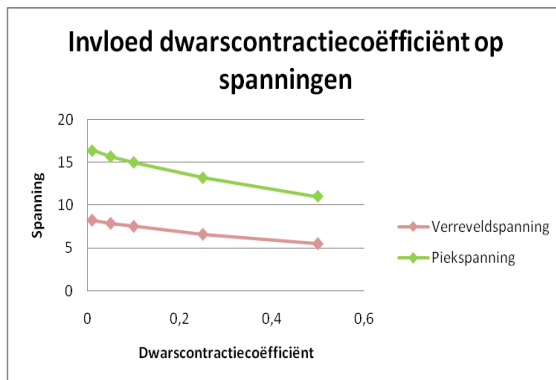


Grafiek 4.12 Invloed ν op verrevelspanning

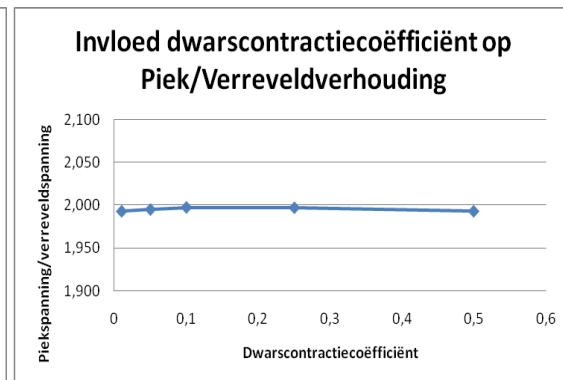


Grafiek 4.13 Invloed ν op piekspanning

De twee bovenstaande grafieken laten het verloop zien van de twee spanningen als functie van de dwarscontractiecoëfficiënt. In onderstaande grafieken is duidelijker te zien dat de verhouding weer rond 2 ligt.



Grafiek 4.14 Invloed v op spanningen



Grafiek 4.15 Invloed v op verhouding

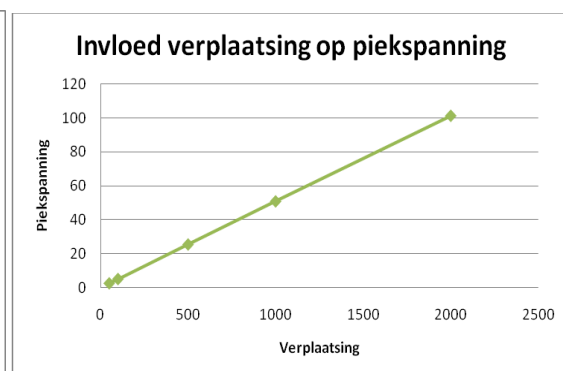
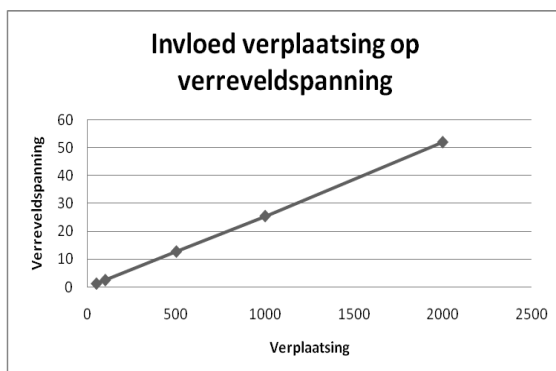
Opgelegde verplaatsing

Nu duidelijk is dat de overige parameters geen invloed hebben op de verhouding tussen de spanningen, kan de grootte van de opgelegde verplaatsing – en daarmee de grootte van de aangebrachte schuifspanning – worden veranderd. De resultaten zijn in Tabel 4.6 geplaatst.

Test	Opgelegde verplaatsing	Spanningen		Verhouding Piek/Verrevel
		Verrevel	Piek	
30	50	1,27	2,54	2,000
31	100	2,54	5,084	2,002
33	500	12,75	25,42	1,994
34	1000	25,45	50,82	1,997
35	2000	51,9	101,2	1,950

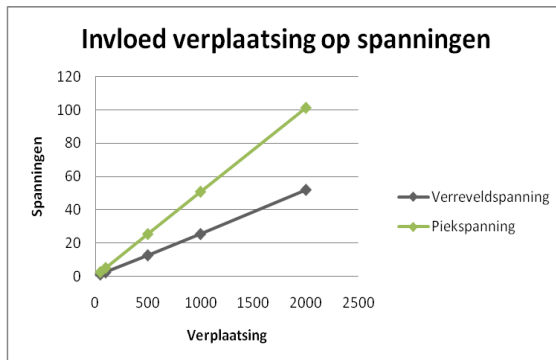
E	2
r	2500
a	50000
v	0,3

Tabel 4.6 Invloed van de opgelegde verplaatsing

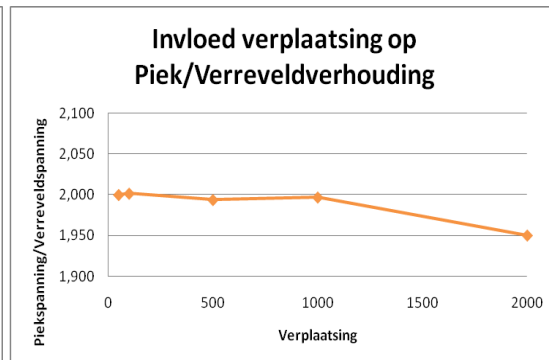


Grafiek 4.16 Invloed verplaatsing op verrevelspanning Grafiek 4.17 Invloed verplaatsing op piekspanning

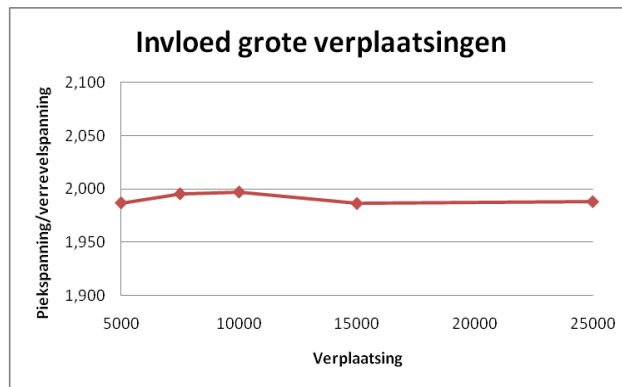
Uit bovenstaande grafieken is de invloed van de verplaatsing op de spanningen te zien. Dit is een op het eerste gezicht lineair verband, wat men ook zou kunnen verwachten. Wanneer men de twee afzonderlijke grafieken samenvoegt tot Grafiek 4.18, is te zien dat de factor 2 nog steeds geldig is. Grafiek 4.19 laat echter zien dat voor relatief grote verplaatsingen, de resultaten mogelijk niet altijd even nauwkeurig zijn. De resultaten van onderzoek naar grotere verplaatsingen, uit Grafiek 4.20 af te lezen, laten zien dat de grootte van de verplaatsing er niet toe doet. Zelfs bij een grootte van 50% ligt verhouding piek-/verrevelspanning nog steeds rond 2.



Grafiek 4.18 Invloed verplaatsing op spanningen



Grafiek 4.19 Invloed verplaatsingen op verhouding



Grafiek 4.20 Invloed grote verplaatsingen

4.2 Verbanden

Piekspanning en verreveldspanning

Uit de voorgaande paragraaf is gebleken dat de verhouding tussen de twee onderzochte spanningen ongeveer 2 bedraagt. Na het uitvoeren van 35 tests, met elk een andere set parameters, was het gemiddelde 1,996 met een standaardafwijking van 0,018. Hieruit kan geconcludeerd worden dat geldt:

$$Piekspanning = 2 \times Verreveldspanning$$

Volumegrootte

De invloed van de afmetingen op de verreveldspanning is te vinden in Grafiek 4.4. Het verband wat hieruit kan worden afgeleid is:

$$Verreveldspanning = \frac{769,2}{a}$$

Straalgrootte

De straalgrootte is niet van significante invloed op de verreveldspanning.

Elasticiteitsmodulus

Uit Grafiek 4.9 is het volgende verband op te maken tussen de verreveldspanning en de elasticiteitsmodulus:

$$Verreveldspanning = 0,00769 \times E$$

Dwarscontractiecoëfficiënt

In Grafiek 4.12 is te zien dat het verband tussen de dwarscontractiecoëfficiënt en de verreveldspanning niet lineair is. Het verband blijkt als volgt te bestaan:

$$Verreveldspanning = 16,667 \times \frac{1}{2(1 + \nu)}$$

Opgelegde verplaatsing

Tot slot laat Grafiek 4.16 een lineair verband zien tussen de opgelegde verplaatsing en de verreveldspanning:

$$Verreveldspanning = 0,0256 \times d$$

Combinatie

Een combinatie van bovenstaande vergelijkingen leidt tot onderstaande formule:

$$Verreveldspanning = 4 \times \frac{E}{2(1 + \nu)} \times \frac{d}{a}$$

Deze is ook als volgt te schrijven:

$$Verreveldspanning = 2 \times \frac{E}{(1 + \nu)} \times \frac{d}{a}$$

Waarmee de formule voor de piekspanning als volgt te schrijven is:

$$Piekspanning = 4 \times \frac{E}{(1 + \nu)} \times \frac{d}{a}$$

4.3 Controle

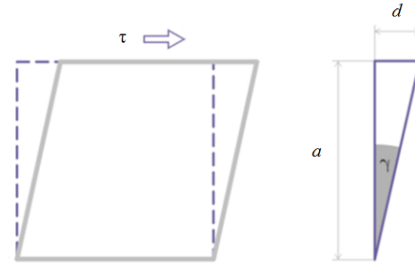
Hier zullen de gevonden verbanden worden gecontroleerd aan de hand van een theoretische uitleg, en aan de hand van een numerieke controle met ANSYS.

Theoretisch

In het algemeen geldt: $\tau = G \times \gamma$

met de glijdingsmodulus $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$

en de hoekverdraaiing $\gamma = \frac{d}{a}$ voor $d \ll a$.



Figuur 4.3 Definitie van τ , d en a

Een combinatie hiervan geeft $\tau = \frac{E}{2(1+\nu)} \times \frac{d}{a}$

Dit scheelt een factor 4 met de formule gevonden in paragraaf 4.2. Deze is te verklaren door het feit dat de verplaatsing d op vier vlakken is aangebracht, en niet slechts op één vlak, zoals in de afleiding hierboven vanuit wordt gegaan. De gevonden relatie tussen de verreveldspanning en de parameters is dus theoretisch verklaarbaar.

Numeriek

Het controleren van de gevonden verbanden kan ook met ANSYS gebeuren. Hiertoe zijn nog enkele tests uitgevoerd, met verschillende waarden voor de parameters. In Tabel 4.7 is te zien dat zich bij deze nieuwe resultaten wederom een factor 2 bevindt tussen de piekspanning en de verreveldspanning.

Test	E	r	a	v	d	Spanningen		Verhouding Piek/Verreeld
						Verreeld	Piek	
36	100	2000	45000	0,1	100	0,397	0,799	2,013
37	500	2000	45000	0,1	20	0,402	0,802	1,995
38	500	4000	45000	0,1	20	0,385	0,791	2,055
39	500	1000	45000	0,1	20	0,403	0,792	1,965
40	500	2000	45000	0,2	20	0,369	0,733	1,986
41	1000	2000	45000	0,1	20	0,803	1,604	1,998
42	500	2000	45000	0,1	40	0,802	1,604	2,000
43	800	4200	53500	0,25	275	6,51	12,95	1,989
44	50000	3300	75000	0,42	120	112,6	223,4	1,984
45	110000	6000	62000	0,42	120	297,8	586,8	1,970
46	10000	5000	50000	0,28	200	61,4	122,3	1,992
47	14000	4500	55000	0,05	400	190,4	379,5	1,993
48	5000	2600	42000	0,35	500	87,3	174,1	1,994
49	75000	2000	50000	0,15	350	907,5	1807	1,991
50	10	3500	64000	0,08	50	0,0142	0,0286	2,014

Tabel 4.7 Controle piek-/verreveldspanning

Tabel 4.8 laat zien dat voor deze resultaten de verreveldspanning over het algemeen niet meer dan 1 á 2% afwijkt van de voorspelde waarden aan de hand van de formule uit paragraaf 4.2. Dit bevestigt de eerder gevonden formule.

Test	Spanningen		Verhouding Piek/Verrevelde	Voorspelling Verrevelde	Afwijking	
	Verrevelde	Piek			Absoluut	Relatief
36	0,397	0,799	2,013	0,404	0,007	0,018
37	0,402	0,802	1,995	0,404	0,002	0,005
38	0,385	0,791	2,055	0,404	0,019	0,049
39	0,403	0,792	1,965	0,404	0,001	0,003
40	0,369	0,733	1,986	0,370	0,001	0,004
41	0,803	1,604	1,998	0,808	0,005	0,006
42	0,802	1,604	2,000	0,808	0,006	0,008
43	6,51	12,95	1,989	6,579	0,069	0,011
44	112,6	223,4	1,984	112,676	0,076	0,001
45	297,8	586,8	1,970	299,864	2,064	0,007
46	61,4	122,3	1,992	62,500	1,100	0,018
47	190,4	379,5	1,993	193,939	3,539	0,019
48	87,3	174,1	1,994	88,183	0,883	0,010
49	907,5	1807	1,991	913,043	5,543	0,006
50	0,0142	0,0286	2,014	0,014	0,000	0,019

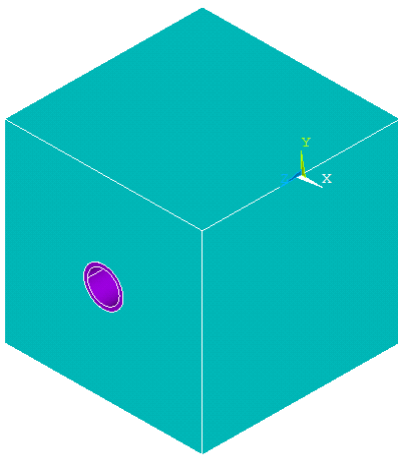
Tabel 4.8 Controle verreveldspanning

Na een totaal van 50 tests te hebben uitgevoerd, is de gemiddelde verhouding tussen de piek- en verreveldspanning 1,996 met een standaardafwijking van 0,017. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de piekspanning twee maal zo groot is als de verreveldspanning.

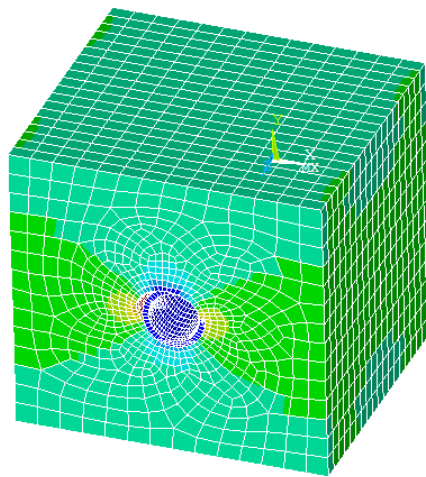
Hoofdstuk 5. Toepassing

Een verdere toepassing van de gevonden verbanden kan gevonden worden in de tunnelbouw. Als de grond rond een tunnel ongelijke zettingen vertoont, ontstaan er schuifspanningen loodrecht op de doorsnede van de buis.

Getracht is met ANSYS een tunnelbuis te modelleren met een zekere dikte t , die zich in het cilindrische gat uit het eerdere model bevindt. Helaas is hier nog geen concreet resultaat uit voortgekomen, voornamelijk omdat het modelleren van contactoppervlakken in ANSYS erg ingewikkeld is. Wel wordt opgemerkt dat hier zeker mogelijkheden tot verder onderzoek liggen.



Figuur 5.1 Tunnelbuis in grond



Figuur 5.2 Tunnelbuis verplaatst niet door gebrek aan contact

Conclusie

Na onderzoek naar de schuifspanningen in een volume met een cilindrisch gat, blijken de volgende parameters van invloed op de spanningen:

- Elasticiteitsmodulus E
- Dwarscontractiecoëfficiënt ν
- Grootte van de opgelegde verplaatsing d , opgelegd op vier zijden van het volume
- Afmetingen van het volume a

De grootte van de straal in het blok blijkt niet van belang, zolang deze maar klein genoeg is ten opzichte van de andere afmetingen. Een verhouding straal/hoofdafmeting van 20 á 28 is voldoende.

De spanning in het ongestoorde deel, de verreveldspanning, is als volgt uit te drukken:

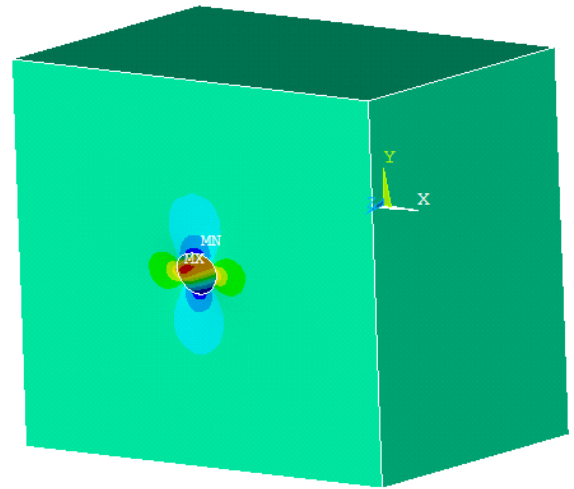
$$\text{Verreveldspanning} = 2 \times \frac{E}{(1 + \nu)} \times \frac{d}{a}$$

Rond het gat treedt de maximale spanning op. Deze piekspanning blijkt zich te verhouden tot de verreveldspanning volgens:

$$\text{Piekspanning} = 2 \times \text{Verreveldspanning}$$

Hiermee is de piekspanning ook als volgt uit te drukken:

$$\text{Piekspanning} = 4 \times \frac{E}{(1 + \nu)} \times \frac{d}{a}$$



Verder onderzoek zou het toepassingsgebied van de resultaten kunnen vergroten, door bijvoorbeeld te kijken naar een (betonnen) tunnelbuis die zich in het gat bevindt.

Bijlage 1. Literatuurlijst

S.P. Timoshenko en J.N. Goodier (1934). *Theory of Elasticity* 3e dr.
Singapore: McGraw-Hill, Inc.

SAS IP, Inc. (2007). *Release 11.0 Documentation for ANSYS*.

University of Alberta (2001). *ANSYS Tutorials*.
<http://www.mece.ualberta.ca/tutorials/ansys/index.html>
Geraadpleegd april 2010.

Bijlage 2. Figurenlijst

FIGUUR 1.1 PLAAT ONDER TREK; PLAAT ONDER TREK EN DRUK; PLAAT ONDER SCHUIFSPANNING	7
FIGUUR 1.2 SCHUIFSPANNING OP VOLUME	FIGUUR 1.3 SCHUIFSPANNING DOOR NORMAALSPANNINGEN
8	8
FIGUUR 1.4 OPGELEGDE VERVORMING – ZIJAAZICHT	8
FIGUUR 2.1 CREËREN RECHTHOEK	FIGUUR 2.2 CREËREN CIRKEL.....
10	10
FIGUUR 2.3 CIRKEL VAN RECHTHOEK AFTREKKEN	FIGUUR 2.4 UITTREKKEN TOT LENGTE L.....
10	10
FIGUUR 2.5 GEOMETRIE VAN SOLID45	11
FIGUUR 2.6 VOORAANZICHT HET OPGEDEELDE VOLUME	FIGUUR 2.7 HET OPGEDEELDE VOLUME
11	11
FIGUUR 2.8 BELASTING OP ÉÉN VAN DE VLAKKEN.....	12
FIGUUR 2.9 BELASTING OP VIER ZIJDEN - ZIJAAZICHT	FIGUUR 2.10 BELASTING OP VIER ZIJDEN - 3D
13	13
FIGUUR 2.11 OPLEGGINGEN	13
FIGUUR 2.12 EERSTE HELFT CILINDER	FIGUUR 2.13 TWEEDE HELFT CILINDER
14	14
FIGUUR 2.14 BLOK OM CILINDER.....	14
FIGUUR 2.15 UITEINDELIJKE VOLUME	FIGUUR 2.16 UITEINDELIJKE VOLUME.....
15	15
FIGUUR 2.17 GEOMETRIE VAN SOLID92	15
FIGUUR 2.18 OPGEDEELD VOLUME	FIGUUR 2.19 OPGEDEELD VOLUME: DETAIL.....
16	16
FIGUUR 2.20 NORMAALSPANNINGEN – ZIJAAZICHT	FIGUUR 2.21 NORMAALSPANNINGEN - 3D.....
16	16
FIGUUR 2.22 DE PLAATSEN VAN DE OPGELEGDE VERVORMINGEN.....	17
FIGUUR 2.23 VERVORMD VOLUME	FIGUUR 2.24 SCHUIFSPANNINGEN
FIGUUR 2.25 DOORSNEDE IN HET MIDDEN	17
17	17
FIGUUR 3.1 SPANNINGSCONCENTRATIES DOOR OPLEGREACTIES.....	18
FIGUUR 3.2 EXCENTRISCHE KRACHTEN.....	18
FIGUUR 3.3 VERVORMD VOLUME; OVERZICHT VAN DE SPANNINGEN; PIEKSPANNINGEN ROND HET GAT	19
FIGUUR 4.1 RESULTATEN VAN TEST 7	FIGUUR 4.2 RESULTATEN VAN TEST 14.....
22	22
FIGUUR 5.1 TUNNELBUIJS IN GROND	FIGUUR 5.2 TUNNELBUIJS VERPLAATST NIET DOOR GEBREK AAN CONTACT
32	32
GRAFIEK 4.1 INVLOED SMARTSIZE OP PIEKSPANNING	GRAFIEK 4.2 INVLOED SMARTSIZE OP DE VERHOUDING
21	21
GRAFIEK 4.3 INVLOED AFMETINGEN OP PIEKSPANNINGEN	GRAFIEK 4.4 INVLOED AFMETINGEN OP VERREVELDSPANNING ...
23	23
GRAFIEK 4.5 INVLOED AFMETINGEN OP SPANNINGEN	GRAFIEK 4.6 INVLOED AFMETINGEN OP VERHOUDING
23	23
GRAFIEK 4.7 INVLOED STRAALGROOTTE OP PIEKSPANNING	GRAFIEK 4.8 INVLOED STRAALGROOTTE OP VERHOUDING
24	24
GRAFIEK 4.9 INVLOED E-MODULUS OP VERREVELDSPANNING	GRAFIEK 4.10 INVLOED E-MODULUS OP PIEKSPANNING
25	25
GRAFIEK 4.11 INVLOED E-MODULUS OP VERHOUDING	25
GRAFIEK 4.12 INVLOED V OP VERREVELDSPANNING	GRAFIEK 4.13 INVLOED V OP PIEKSPANNING
26	26
GRAFIEK 4.14 INVLOED V OP SPANNINGEN	GRAFIEK 4.15 INVLOED V OP VERHOUDING
27	27
GRAFIEK 4.16 INVLOED VERPLAATSING OP VERREVELDSPANNING	GRAFIEK 4.17 INVLOED VERPLAATSING OP PIEKSPANNING ..
27	27
GRAFIEK 4.18 INVLOED VERPLAATSING OP SPANNINGEN	GRAFIEK 4.19 INVLOED VERPLAATSINGEN OP VERHOUDING
28	28
GRAFIEK 4.20 INVLOED GROTE VERPLAATSINGEN	28
TABEL 4.1 INVLOED VAN DE ELEMENTGROOTTE	21
TABEL 4.2 INVLOED VAN DE VOLUME GROOTTE.....	22
TABEL 4.3 INVLOED VAN DE STRAALGROOTTE.....	24
TABEL 4.4 INVLOED VAN DE ELASTICITEITSMODULUS	25
TABEL 4.5 INVLOED VAN DE DWARS CONTRACTIE COËFFICIENT	26
TABEL 4.6 INVLOED VAN DE OPGELEGDE VERPLAATSING	27
TABEL 4.7 CONTROLE PIEK-/VERREVELDSPANNING	30
TABEL 4.8 CONTROLE VERREVELDSPANNING	31

Bijlage 3. ANSYS-scripts

Model 1

```
/TITLE,MODEL1  
/PREP7
```

```
SPANNING = 10
```

```
!GEOMETRIE  
LENGTH=50000          !LENGTE L GRONDMOOT  
WIDTH=50000            !BREEDTE B GRONDMOOT  
HEIGHT=50000           !HOOGTE H GRONDMOOT  
RADIUS=2500            !STRAAL R BUIS  
  
BLC4,-WIDTH/2,-HEIGHT/2,WIDTH,HEIGHT  
    !RECHTHOEK, GROOTTE B*H, OORSPRONG IN HET MIDDEN  
CYL4,0,0,RADIUS        !CIRKEL MET STRAAL R, MIDDEN IN RECHTHOEK  
  
ASBA,1,2               !OPPERVLAKTE CIRKEL UIT RECHTHOEK HALEN  
VEXT,3,,,,,LENGTH     !ONTSTANE OPPERVLAK UITREKKEN TOT LENGTE L
```

```
!MATERIAALEIGENSCHAPPEN  
YOUNG=200000           !E-MODULUS  
DWARSC=0.3             !DWARSCONTRACTIECOEFFICIENT  
MP,EX,1,YOUNG  
MP,PRXY,1,DWARSC
```

```
!MESHING  
ET,VI,SOLID45          !ELEMENTTYPE SOLID45  
TYPE, 1  
MAT,  
REAL,  
ESYS, 0  
SECNUM,
```

```
SMRT,6
```

```
CM,_Y,VOLU  
VSEL, , , , 1  
CM,_YI,VOLU  
CHKMSH,'VOLU'  
CMSEL,S,_Y
```

```
VSWEEP,_YI
```

```
CMDELE,_Y
```

CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2

NSEL,S,LOC,Z,LENGTH
*GET, AANTAL1,NODE, 0,COUNT
*GET,OPPERVLAK1,AREA,1,AREA
KRACHT=SPANNING*OPPERVLAK1/AANTAL1
F,ALL,FY,KRACHT
NSEL,ALL

NSEL,S,LOC,Z,0
*GET, AANTAL2,NODE, 0,COUNT
*GET,OPPERVLAK2,AREA,3,AREA
KRACHT=SPANNING*OPPERVLAK2/AANTAL2
F,ALL,FY,-10000
NSEL,ALL

NSEL,S,LOC,Y,HEIGHT/2
*GET, AANTAL3,NODE, 0,COUNT
*GET,OPPERVLAK3,AREA,5,AREA
KRACHT=SPANNING*OPPERVLAK3/AANTAL3
F,ALL,FZ,10000
NSEL,ALL

NSEL,S,LOC,Y,-HEIGHT/2
*GET, AANTAL,NODE, 0,COUNT
*GET,OPPERVLAK4,AREA,2,AREA
KRACHT=SPANNING*OPPERVLAK4/AANTAL
F,ALL,FZ,-10000
NSEL,ALL

DK,10,UY,0,,,UX,UZ
DK,9,UY,0,,,UZ
DK,2,UY,0

FINISH
/SOLU

ANTYPE,0 !STATIC

SOLVE
FINISH

Model 2

/TITLE,MODEL2
/PREP7

!PARAMETERS
SPANNING = 10

WIDTH=50000
HEIGHT=50000
RADIUS=2500

!BREEDTE B GRONDMOOT
!HOOGTE H GRONDMOOT
!STRAAL R BUIS

CYL4,0,0,RADIUS,,,,HEIGHT/SQRT(2)
CYL4,0,0,RADIUS,,,,-HEIGHT/SQRT(2)

K,101,WIDTH/2,0,HEIGHT/SQRT(2)
K,102,WIDTH/2,HEIGHT/SQRT(2),0
K,103,WIDTH/2,0,-HEIGHT/SQRT(2)
K,104,WIDTH/2,-HEIGHT/SQRT(2),0
K,105,-WIDTH/2,0,HEIGHT/SQRT(2)
K,106,-WIDTH/2,HEIGHT/SQRT(2),0
K,107,-WIDTH/2,0,-HEIGHT/SQRT(2)
K,108,-WIDTH/2,-HEIGHT/SQRT(2),0

A,101,102,103,104
A,105,106,107,108
A,101,105,108,104
A,102,106,107,103
A,101,102,106,105
A,103,104,108,107

VA,9,10,11,12,13,14

VSBV,3,1
VSBV,4,2

!MATERIAALEIGENSCHAPPEN
YOUNG=200000
DWARSC=0.3
MP,EX,1,YOUNG
MP,PRXY,1,DWARSC
!MESHING
ET,VI,SOLID92

!E-MODULUS
!DWARSCONTRACTIECOEFFICIENT

SMRT,3
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , , I
CM,_YI,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y

VCLEAR,_YI

VMESH,_YI

CMDELE,_Y

CMDELE,_YI

CMDELE,_Y2

!BELASTINGEN

SFA,17,,PRES,SPANNING

SFA,11,,PRES,SPANNING

SFA,18,,PRES,-SPANNING

SFA,4,,PRES,-SPANNING

!OPLEGGINGEN

DK,104,UX,0,,UY,UZ

DK,108,UZ,0,,UY

DK,105,UX,0

FINISH

/SOLU

ANTYPE,0

!STATIC

SOLVE

FINISH

Model 3

/TITLE,MODEL3
/PREP7

VERV=250

!GROOTTE VAN DE VERVORMING

AFST=64000
RADIUS=2500

!STRAAL R BUIS

BLC4,-AFST/2,-AFST/2,AFST,AFST
CYL4,0,0,RADIUS

!RECHTHOEK, GROOTTE B*H, OORSPRONG IN HET MIDDEN
!CIRKEL MET STRAAL R, MIDDEN IN RECHTHOEK

ASBA,1,2
VEXT,3,,,,,AFST

!OPPERVLAKTE CIRKEL UIT RECHTHOEK HALEN
!ONTSTANE OPPERVLAK UITREKKEN TOT LENGTE L

!MATERIAALEIGENSCHAPPEN
YOUNG=2
DWARSC=0.3
MP,EX,1,YOUNG
MP,PRXY,1,DWARSC

!E-MODULUS
!DWARSCONTRACTIECOEFFICIENT

!MESHING
ET,VI,SOLID45

!ELEMENTTYPE SOLID45

SMRT,5
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , , I
CM,_YI,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y

VSWEEP,_YI

CMDELE,_Y
CMDELE,_YI
CMDELE,_Y2

DA,1,UY,VERV
DA,3,UY,-VERV
DA,5,UZ,VERV
DA,2,UZ,-VERV
DL,18,,UX,0
DL,17,,UX,0

FINISH
/SOLU

ANTYPE,0

!STATIC

SOLVE
FINISH

Bijlage 4. Resultaten

Test	E	r	a	v	d	SmartSize	Spanningen		Verhouding Piek/Verrevel
							Verrevel	Piek	
1	2	2500	50000	0,3	250	5	0,0153	0,0295	1,928
2	2	2500	50000	0,3	250	4	0,0154	0,0302	1,961
3	2	2500	50000	0,3	250	3	0,0153	0,0304	1,987
4	2	2500	50000	0,3	250	2	0,0153	0,0305	1,993
5	2	2500	50000	0,3	250	1	0,0153	0,0306	2,000
6	2	2500	100000	0,3	250	2	0,00767	0,01527	1,991
7	2	2500	90000	0,3	250	2	0,00855	0,01695	1,982
8	2	2500	80000	0,3	250	2	0,00955	0,01905	1,995
9	2	2500	70000	0,3	250	2	0,0109	0,0218	2,000
10	2	2500	60000	0,3	250	2	0,0127	0,0254	2,000
11	2	2500	40000	0,3	250	2	0,0191	0,038	1,990
12	2	2500	30000	0,3	250	1	0,0248	0,0504	2,032
13	2	2500	20000	0,3	250	1	0,037	0,0743	2,008
14	2	2500	10000	0,3	250	1	0,069	0,135	1,957
15	2	5000	50000	0,3	250	1	0,0152	0,0301	1,980
16	2	4000	50000	0,3	250	1	0,015	0,0302	2,013
17	2	1000	50000	0,3	250	1	0,0153	0,0305	1,993
18	2	2000	50000	0,3	250	2	0,0154	0,0305	1,981
19	2	3000	50000	0,3	250	2	0,0154	0,0305	1,981
20	20	2500	50000	0,3	250	2	0,153	0,305	1,993
21	100	2500	50000	0,3	250	2	0,76	1,53	2,013
22	500	2500	50000	0,3	250	2	3,83	7,63	1,992
23	1000	2500	50000	0,3	250	2	7,65	15,3	2,000
24	200000	2500	50000	0,3	250	2	1530	3050	1,993
25	1000	2500	60000	0,01	250	2	8,23	16,4	1,993
26	1000	2500	60000	0,05	250	2	7,87	15,7	1,995
27	1000	2500	60000	0,1	250	2	7,52	15,02	1,997
28	1000	2500	60000	0,25	250	2	6,61	13,2	1,997
29	1000	2500	60000	0,499	250	2	5,53	11,02	1,993
30	1000	2500	60000	0,3	50	2	1,27	2,54	2,000
31	1000	2500	60000	0,3	100	2	2,54	5,084	2,002
32	500	2500	60000	0,3	100	2	1,27	2,54	2,000
33	1000	2500	60000	0,3	500	2	12,75	25,42	1,994
34	1000	2500	60000	0,3	1000	2	25,45	50,82	1,997
35	1000	2500	60000	0,3	2000	2	51,9	101,2	1,950
36	100	2000	45000	0,1	100	2	0,397	0,799	2,013
37	500	2000	45000	0,1	20	2	0,402	0,802	1,995
38	500	4000	45000	0,1	20	2	0,385	0,791	2,055
39	500	1000	45000	0,1	20	2	0,403	0,792	1,965
40	500	2000	45000	0,2	20	2	0,369	0,733	1,986

Test	E	r	a	v	d	Spanningen		Verhouding Piek/Verrevelde
						Verrevelde	Piek	
36	100	2000	45000	0,1	100	0,397	0,799	2,013
37	500	2000	45000	0,1	20	0,402	0,802	1,995
38	500	4000	45000	0,1	20	0,385	0,791	2,055
39	500	1000	45000	0,1	20	0,403	0,792	1,965
40	500	2000	45000	0,2	20	0,369	0,733	1,986
41	1000	2000	45000	0,1	20	0,803	1,604	1,998
42	500	2000	45000	0,1	40	0,802	1,604	2,000
43	800	4200	53500	0,25	275	6,51	12,95	1,989
44	50000	3300	75000	0,42	120	112,6	223,4	1,984
45	110000	6000	62000	0,42	120	297,8	586,8	1,970
46	10000	5000	50000	0,28	200	61,4	122,3	1,992
47	14000	4500	55000	0,05	400	190,4	379,5	1,993
48	5000	2600	42000	0,35	500	87,3	174,1	1,994
49	75000	2000	50000	0,15	350	907,5	1807	1,991
50	10	3500	64000	0,08	50	0,0142	0,0286	2,014
51	10	3500	64000	0,08	5000	1,44	2,861	1,987
52	10	3500	64000	0,08	7500	2,15	4,29	1,995
53	100	3500	50000	0,2	10000	32,9	65,7	1,997
54	100	3500	50000	0,2	25000	82,7	164,4	1,988
55	1000	2500	50000	0,25	15000	479	951,4	1,986